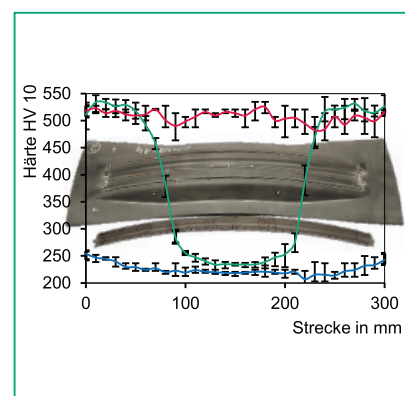
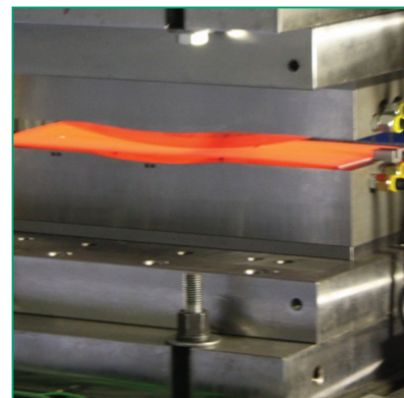
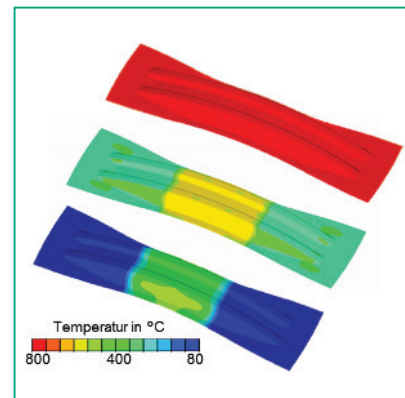


Jörn Moritz

# Alternative Verfahren der Warmblech- umformung zur Erzeugung lokal angepasster Bauteileigenschaften

*Berichte aus dem IFUM · Band 1/2018**Herausgeber: Bernd-Arno Behrens*

## Berichte aus dem IFUM

Wissenschaftliche Schriftenreihe des  
Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen  
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Zugleich: Dissertation,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2018

### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2018  
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen  
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037  
[www.tewiss-verlag.de](http://www.tewiss-verlag.de) ♦ mail: [info@tewiss-verlag.de](mailto:info@tewiss-verlag.de)

ISBN 978-3-95900-184-7  
ISSN 1613-9704

Verlag: TEWISS Verlag,  
TEWISS-Technik und Wissen GmbH

Herstellung: DruckTeam Druckgesellschaft mbH, Hannover  
Printed in Germany

# **Alternative Verfahren der Warmblechumformung zur Erzeugung lokal angepasster Bauteileigenschaften**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jörn Moritz

2018

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Tag der Promotion: 15.01.2018

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Die durchgeführten Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell unterstützt.

Herrn Professor Bernd-Arno Behrens, dem Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen, gilt mein besonderer Dank für die vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe. Herrn Professor Maier danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Herrn Professor Lachmayer gilt mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, insbesondere bei Christoph Gaebel, Thomas Huinink, Jens Schrödter, Holger Meyer, Anas Bouguecha, Kai Brunotte und Milan Vucetic für die sehr gute kollegiale Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima während meiner Institutszeit. Für die Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Arbeiten danke ich insbesondere Heiko Holzapfel, Peter Linder, Matthias Longardt, Gerd Hoppe und für die metallographischen Untersuchungen der Bauteile Frau Bettina Niemeyer. Für die Unterstützung im Rahmen der Simulationsrechnungen danke ich Jens Schrödter, Thorsten Matthias und Johanna Uhe. Für die kritische Durchsicht der Arbeit, die hilfreichen Anregungen und die Diskussionsbereitschaft danke ich Hendrik Vogt, Christoph Gaebel und Johanna Uhe.

Bei den Kollegen des Instituts für Werkstoffkunde, namentlich Max Diekamp, Florian Nürnberger, Gregor Bonk und Lars Wolf möchte ich mich für die angenehme Zusammenarbeit und die im Rahmen der Praxisversuche gewährte Unterstützung bedanken. Ferner möchte ich den wissenschaftlichen Hilfskräften sowie den Studien- und Diplomarbeitern Eike Stührenberg, Per-Ole Petersen, Simon Gnaß, Hamdi Dammak, Konstantin Neufeld, Stefanie Schönbeck, Martin Jeske, Jan-Hendrik Kurzawski und Roman Klie danken, die mich während meiner Zeit am IFUM tatkräftig unterstützt haben.

Gar nicht genug danken kann ich meiner Familie. Diesen Weg ermöglicht haben mir meine Eltern Sigurd und Roswitha Moritz, sowie mein Bruder Ulrich Moritz. Ihnen danke ich für ihr stets uneingeschränktes Vertrauen. Meine Frau Lena und meinen Sohn Jannik möchte ich besonders hervorheben und danke den Beiden von ganzem Herzen für die stetige Unterstützung und Liebe.

Schließlich widme ich diese Arbeit meiner Mutter Roswitha Moritz, die richtungsweisend auf mich eingewirkt und so diese Arbeit ermöglicht hat.

Hannover, im Januar 2018

Jörn Moritz

## Kurzfassung

Das Gesamtgewicht der Fahrzeuge im Automobilbau hat in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund von immer höher werdenden Sicherheitsstandards und Ansprüchen an Ausstattung und Komfort einen stetigen Anstieg erlebt. Eine Umkehr dieser Gewichtsspirale wird in der Karosseriekonstruktion, die mit einem Drittel den größten Anteil an der Fahrzeuggesamtmasse ausmacht, unter anderem durch neue Leichtbautechnologien erzielt. Der Anteil von ultrahochfesten Stahlgüten als Strukturbauteile der Karosserie wurde daher deutlich erhöht und so bei gleichbleibenden Sicherheitsanforderungen eine Gewichtsreduktion geschaffen. Das Formhärten und das Erzeugen von lokal angepassten Bauteileigenschaften (Tailored Properties) hat in diesem Zusammenhang eine große Bedeutung erlangt. Mit diesem Verfahren können ultrahochfeste Bauteilbereiche und Bauteilbereiche mit einer höheren Duktilität, und damit einhergehend einer höheren absorbierbaren Deformationsenergie, in einem Bauteil erzeugt werden. In dieser Arbeit werden die bisher bekannten Verfahren zur Erzeugung von lokal angepassten Bauteileigenschaften aufgezeigt und zwei neue Varianten entwickelt und analysiert, mit denen der bisherige Stand der Wissenschaft und Technik des Formhärtens erweitert wird. Die Vorteile der ersten Variante, der *Warmumformung mit anschließender Wärmebehandlung*, liegen hauptsächlich in der Produktionssteigerung. Der Umformvorgang nimmt nur noch einen Bruchteil der Prozesszeiten ein. Die für das Härten der Bauteile notwendige Haltezeit im Werkzeug entfällt und wird außerhalb der Presse durchgeführt. Des Weiteren ist mit Hilfe dieser Prozesskette das Einstellen spezifischer Gefügestände in einem Bauteil möglich. Somit können lokal unterschiedliche Bauteileigenschaften erzielt werden, ohne dabei die Komplexität der Werkzeuge zu erhöhen. Diese Prozesskette bietet sich vor allem bei hohen Stückzahlen an, bei dem die Taktzeit der Presse der entscheidende Faktor zur Produktivitätssteigerung ist. Die Prozessparameter zur Erzeugung lokal angepasster Eigenschaften am Bauteil werden in dieser Arbeit für die Geometrie eines Stoßfängerquerträgers ermittelt. Hierbei steht die reproduzierbare Erzeugung von spezifischen Festigkeitsbereichen im Vordergrund und wird im Folgenden vorgestellt. Des Weiteren wird die sich einstellende Formabweichung infolge der Prozesszeitverkürzung dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse wird das Potenzial der neuen Prozesskette aufgezeigt. Im zweiten Teil dieser Arbeit wird ein alternatives Verfahren entwickelt, das bei kleinen und mittleren Losgrößen eine flexible Profilherstellung von höchstfesten Bauteilen ermöglicht. Der wesentliche Vorteil des *Gleitziehbiegens mit gleichzeitiger Wärmebehandlung* liegt hierbei in den geringen Anlagenkosten. Daher bietet sich der Einsatz dieses Verfahrens besonders im Prototypenbau an. Analog zum ersten Teil dieser Arbeit wird ein Versuchsaufbau entwickelt und umgesetzt. In simulativen und experimentellen Versuchen werden die Prozessgrenzen aufgezeigt, die im Rahmen umfangreicher Bauteil- und Prozessanalysen untersucht werden.

Schlagworte: Formhärten, Presshärten, 22MnB5, Wärmebehandlung, Gleitziehbiegen, lokal angepasste Bauteileigenschaften

## Abstract

In the previous decades, the total weight of vehicles has risen significantly due to increasing safety standards and higher demands for equipment and comfort. A reversal of this weight spiral is achieved by new manufacturing technologies in car body construction, which holds the highest share in total vehicle mass with a third. The amount of ultra-high-strength steels in structural components of the body has therefore been significantly increased, leading to a weight reduction while keeping safety standards constant. In this context, form hardening and the manufacturing of components with tailored properties became very important. By means of this process, ultra-high-strength component areas and those with a higher ductility can be produced, thus reaching a higher absorbable deformation energy.

In this research-work, the standard proceedings to manufacture locally tailored component properties will be shown and two novel possibilities which extend the present state-of-the-art of form hardening will be developed and investigated. The first possibility, hot forming with subsequent heat treatment, has its advantages mainly in increasing productivity. The forming process requires only a fraction of the time span of the conventional process. Component hardening takes place outside the press, making holding times obsolete. Moreover, this process chain allows producing tailored properties in one component so that locally tailored component properties can be achieved without increasing tool complexity. This process chain is suitable especially for higher quantities, with the cycle time being the decisive factor for increasing productivity. The process parameters to produce these properties in the component will be investigated for the geometry of a bumper crossbeam in this research-work. Here, the reproductive manufacturing of homogeneous strength areas is paramount and will be presented in the following. In addition, the delay due to the reduction in cycle time will be shown. These results will prove the potential of the novel process chain.

In the second part of this research-work, an alternative process allowing the manufacturing of high-strength profile components will be developed for small and medium-sized batches. The main advantage of heat treatment in draw bending is low equipment costs. Therefore, the process is especially suitable for prototype manufacturing. Analogous to the first part of this work, an experimental test setup will be developed and implemented. In simulative and experimental tests, process limits will be investigated in an extensive component and process analysis.

Keywords: hot stamping, 22MnB5, heat treatment, draw bending, locally tailored component properties

## Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen und Abkürzungen .....	VIII
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik .....	4
2.1	Leichtbaustrategien.....	4
2.2	Umformverfahren zur Herstellung von Profilen .....	10
2.2.1	Walzprofilieren.....	13
2.2.2	Gleitziehbiegen.....	13
2.2.3	Gesenkbiegen .....	16
2.3	Erwärmungsmethoden .....	17
2.4	Warmumformung des Vergütungsstahls 22MnB5.....	22
2.4.1	Werkstoffkundliche Grundlagen .....	23
2.4.2	Verfahrensablauf Formhärten.....	27
2.4.3	Prozessstrategien für das partielle Formhärten .....	28
2.4.4	Beschichtungssysteme für den Mangan-Bor-Stahl.....	34
3	Motivation und Zielsetzung.....	36
4	Versuchsanlagen, Werkstoffe und experimentelle Methoden.....	39
4.1	Warmumformung mit anschließender Wärmebehandlung .....	39
4.2	Gleitziehbiegen mit gleichzeitiger Wärmebehandlung.....	44
4.3	Versuchswerkstoff 22MnB5 .....	48
4.4	Methoden der Prozessüberwachung und Bauteilprüfung.....	49
5	Warmumformung mit anschließender Wärmebehandlung .....	53
5.1	Vorauslegung.....	55
5.1.1	Experimentelle Vorversuche (Machbarkeitsanalyse).....	55
5.1.2	Simulative Vorauslegung.....	63
5.2	Bauteil und Prozessanalyse .....	67
5.2.1	Temperaturverläufe .....	68
5.2.2	Mechanische Eigenschaften.....	70
5.2.3	Gefügezusammensetzung.....	71
5.2.4	Maßhaltigkeit.....	72
5.3	Fazit .....	74



---

6	Gleitziehbiegen mit gleichzeitiger Wärmebehandlung .....	77
6.1	Vorauslegung .....	77
6.2	Bauteil- und Prozessanalyse .....	82
6.2.1	Temperaturverläufe.....	83
6.2.2	Mechanische Eigenschaften .....	85
6.2.3	Gefügezusammensetzung .....	87
6.2.4	Maßhaltigkeit.....	88
6.2.5	Drei-Punkt-Biegeprüfung.....	89
6.2.6	Beschichtungen .....	90
6.3	Fazit.....	91
7	Diskussion.....	93
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	97
9	Literaturverzeichnis .....	100

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$A$	m <sup>2</sup>	Aufstandsfläche
$A_{50}$	%	Bruchdehnung
$A_{c1}$	°C	Temperatur für Beginn der Austenitisierung
$A_{c3}$	°C	Temperatur für Abschluss der Austenitisierung
$C_t$	Nm/°	Torsionssteifigkeit
$H$	HV10	Härte
$L$		Leichtbaugüte
$m_k$	kg	Masse Karosseriestruktur
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze

### Abkürzungen

Al	Aluminium
ATOS	Advanced Topometric Sensor
B	Bor
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
Cr	Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECE	Economic Commission for Europe
EN	Europäisches Institut für Normung
Euro-NCAP	European New Car Assessment Programm
Fe	Eisen
FE	Finite Elemente
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik
GZB	Gleitziehbiegen
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen

---

IR	Infrarot
ISO	Internationale Organisation für Normung
kfz	Kubisch flächenzentriert
krz	Kubisch raumzentriert
KTL	Kathodische Tauchlackierung
Mn	Mangan
MTE	Mantelthermoelement
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
Ti	Titan
TRB	Tailored Rolled Blanks
US-NCAP	US New Car Assessment Program
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild